



**О ВЛИЯНИИ ВНУТРИСКВАЖИННОГО ВИБРОВОЗДЕЙСТВИЯ
НА ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ**

А. О. Кордубайло, Б. Ф. Симонов, Н. С. Нечаев

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru, Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Проведены экспериментальные исследования герметичности цементного камня при воздействии на него скважинного виброисточника. Установлено, что цементный камень, в исходном состоянии имеющий трещиновато-пористую структуру, сохраняет ее при статическом силовом воздействии. При появлении виброимпульсного воздействия в локальной зоне силового контакта в течение первых 10 ч работы исходная структура микротрещин преобразуется в динамическую структуру, при этом в 2–3 раза увеличивается значение относительного снижения давления опрессовки. Показано, что прорыва жидкой фазы через тело цементного камня при нормативном градиенте давления не происходит, что гарантирует отсутствие опасности возникновения заколонных перетоков флюида и воды из-за проведения внутрискважинного вибровоздействия.

Скважинный виброисточник, нефтяной пласт, вибровоздействие, цементная крепь, цементный камень, заколонные перетоки

**ABOUT THE INFLUENCE OF DOWNHOLE VIBRATION EFFECTS ON
CEMENT STONE IMPERMEABILITY**

A. O. Kordubaylo, B. F. Simonov, and N. S. Nechaev

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: Kordubaylo_ao@mail.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

The impermeability of a cement stone was experimentally studied under the effect of downhole vibration source. It is found that cement stone having a fractured-porous structure in the initial state retains it under static force action. When vibropulse effects occur in the local area of power contact during the first 10 hours of operation, the initial structure of microfractures is converted to a dynamic structure, and the value of relative decrease in proof-test pressure drop increases by 2–3 times. It is shown that the breakthrough of the liquid phase through the cement stone body does not occur at the standard pressure gradient, which ensures the absence of behind-the-casing flows of fluid and water due to the downhole vibration effect.

Downhole vibration source, oil reservoir, vibration effect, cementing, cement stone, behind-the-casing flows

Одной из проблем нефтегазовой отрасли в мире является низкий коэффициент извлечения нефти (КИН), который для большинства разрабатываемых месторождений находится в пределах 0.3–0.4. При этом большая часть углеводородов остается запертой в трещиновато-пористой структуре нефтяного коллектора. Традиционные технологии, применяемые при добыче нефтяных залежей и основанные главным образом на поддержании пластового давления путем его заводнения, не способны вовлечь в разработку остаточные скопления углеводородов [1].

Для повышения КИН активно внедряются на промыслах различные методы увеличения нефтеотдачи (МУН). Сложность физических и химических процессов, протекающих в нефтяном пласте, а также геологические особенности разных месторождений, обуславливают их многообразие. Наиболее широкое распространение в настоящее время получили следующие МУН [2–6]:

— химические, основанные на закачке реагентов или заводнении пластов с применением поверхностно-активных веществ;

— тепловые, основанные на вытеснении нефти теплоносителями, либо на воздействии на залежи с помощью внутрипластовых экзотермических окислительных реакций;

— физические, включающие гидроразрыв и виброволновое воздействие на пласт.

Среди указанных особую перспективность имеет метод виброволновой обработки нефтяных пластов, поскольку может применяться как отдельно, так и совместно с другими МУН, увеличивая их эффективность. Для обеспечения наибольшей энергоэффективности вибровоздействия источник упругих колебаний целесообразно располагать непосредственно на глубине залегания пласта, что обуславливает актуальность совершенствования существующих и создания принципиально новых скважинных виброисточников [1, 2, 7].

Цель работы состоит в экспериментальном исследовании герметичности цементного камня при оказании на него виброимпульсного воздействия опытным образцом виброисточника в лабораторных условиях.

Данное исследование — продолжение цикла работ, направленных на создание скважинного электромагнитно-импульсного виброисточника с электромагнитным ударным узлом (ЭУУ) и гидравлическим силовым элементом (СЭ). Обоснование технической возможности появления такой машины и результаты лабораторных испытаний опытного образца изложены в [8, 9].

Скважинный виброисточник (рис. 1) включает гидравлический силовой элемент (СЭ) 1, к которому в нижней части присоединен гидронасос 2, а в верхней — электромагнитный ударный узел (ЭУУ) 3. Виброисточник опущен в скважину на подвеске НКТ 4, вдоль которой протянут кабель к блоку питания и управления 5. При подаче питания на гидронасос 2 происходит заполнение резиновой камеры СЭ 1 рабочей жидкостью под давлением. Камера 12 расширяется и раздвигает пуансоны 6 до упора в эксплуатационную колонну 7. По достижению определенного уровня давления в СЭ 1 гидронасос 2 отключается, маслonaполненная полость СЭ 1 запирается и включается ЭУУ 3. Боек 8 магнитным полем верхней катушки 9 поднимается до верхней мертвой точки, затем магнитным полем нижней катушки 10 и силой тяжести разгоняется и наносит удар по плунжеру 11. Плунжер 11 внедряется в маслonaполненную полость СЭ 1, создавая в ней импульс гидравлического давления, который передается на эксплуатационную колонну и далее в породу.

Эксплуатационная колонна 7 состоит из става стальных обсадных труб и кольцевого цементного камня, заполняющего пространство между обсадной трубой и стенками скважины, пробуренной во вмещающей породе. Одной из основных его функций является разобщение нефтяных и водяных пластов во избежание утечки углеводородов в водоносные горизонты и наоборот. Для этого цементный камень должен быть герметичен и не допускать образования заколонных перетоков. При этом все внутрискважинные технологические операции, включая вибровоздействие, не должны нарушать целостность и герметичность цементной крепи.

Для проведения исследования изготовлен стенд, наиболее важные элементы которого показан на рис. 2. Стенд включает расположенную на бетонном основании раму, на которой установлен фрагмент обсадной трубы 1 и опалубка 2. Внутри трубы 1 размещен СЭ 3, над которым на специальных рамах смонтирован ЭУУ 4. Кольцевое пространство между трубой 1 и опалубкой 2 заполнено тампонажным цементным раствором ПЦТ I-50. Причем перед заливкой рас-

твора к наружной поверхности обсадной трубы встык подведена трубка 5 так, чтобы расстояния от точки соприкосновения трубки 5 с трубой 1 до верхнего и нижнего краев трубы 1 были равны 250 мм. Трубка 5 через коллектор 6 с вентилем 7 связана с ручным плунжерным насосом 8 (на рис. 2 не показан). Для контроля за давлением в гидросистеме предусмотрен манометр 9.

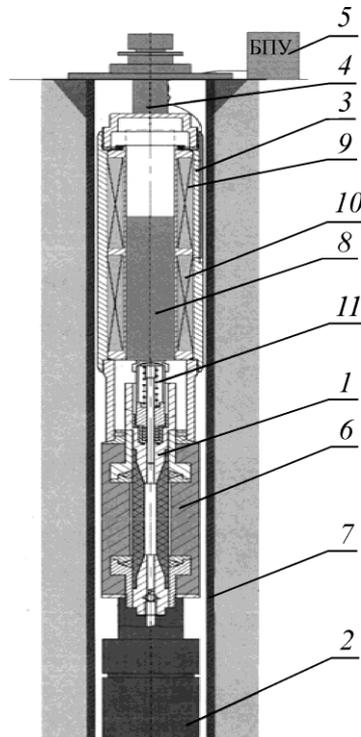


Рис. 1. Компоновка скважинного электромагнитно-импульсного вибросточника

В изготовленном стенде критерием оценки целостности цементного камня является его герметичность. Предполагается насосом 8 подавать воду по трубке 5 к наружной поверхности обсадной трубы 1 и фиксировать падение давления воды с течением времени (операция подобна опрессовке скважин). Процесс выдержки камня под давлением воды в течение 20 мин далее будем называть “опрессовкой”, давление воды, подаваемой по трубке 5 — “давлением опрессовки”. Отношение величины, на которую снизилось давление за 20 мин, к величине начального давления опрессовки, выраженное в процентах, — “относительное снижение давления опрессовки”.

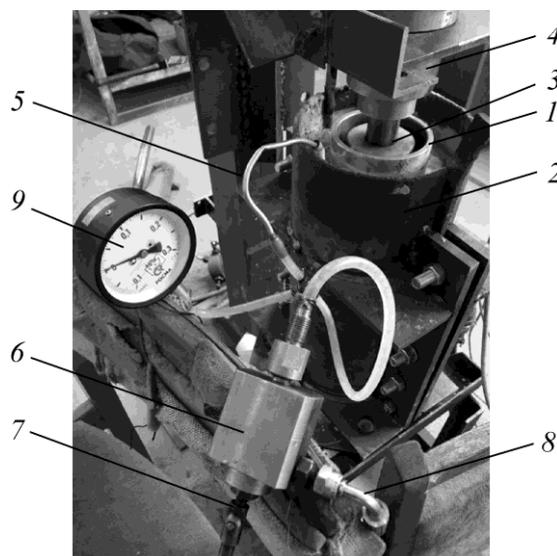


Рис. 2. Фотография стенда для исследования герметичности цементного камня

Известно, что нормативный градиент давления, при котором цементный камень должен сохранять герметичность, равен 2.5 МПа на 1 м цементной крепи. Так как на описанном стенде минимальная высота опасного участка камня составляет 0.25 м, из условия равенства градиента давления давление опрессовки будет 0.625 МПа.

При работе виброисточника на эксплуатационную колонну оказывается непрерывное статическое и периодическое динамическое воздействие. В связи с этим в лабораторных условиях проведены два комплекса испытаний: статические и динамические. Целью статических испытаний является установление зависимости относительного снижения давления опрессовки от давления масла в СЭ, динамических — от наработки виброисточника. В рамках статических испытаний в хронологическом порядке выполнены опрессовки *а–ж* при условиях, приведенных в таблице.

Условия выполнения опрессовок при статических испытаниях

Опрессовка	<i>а</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>	<i>д</i>	<i>е</i>	<i>ж</i>
Нагруженность цементного камня	не нагружен	нагружен	нагружен	разгружен	нагружен	нагружен	разгружен
Давление в СЭ, МПа	0	5	10	0	15	20	0

По результатам статических испытаний построены две зависимости, представленные на рис. 3: кривая 1 — по экспериментам *а, б, в, д, е* отражает герметичность камня при действии статической распорной силы СЭ, кривая 2 — по *а, г, ж* показывает герметичность камня до начала и после прекращения действия распорной силы СЭ.

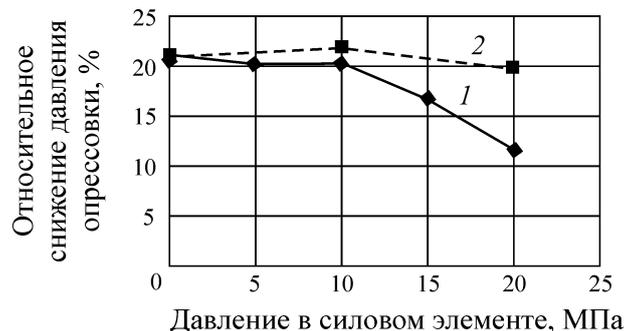


Рис. 3. Зависимость относительного снижения давления опрессовки от давления в СЭ

Из полученных результатов следует:

— после затвердевания цементный камень имеет определенную исходную структуру микротрещин и пор, наличие которых обуславливает относительное снижение давления опрессовки на 21 %;

— увеличение давления в силовом элементе в диапазоне 0–20 МПа ведет к уменьшению относительного снижения давления опрессовки с 21 до 12 % (кривая 1). Это объясняется увеличением сжимающей нагрузки на цементный камень и закрытием микротрещин в теле камня;

— после снятия нагрузки на цементный камень относительное снижение давления опрессовки практически равно исходному (кривая 2). Это значит, что статическое нагружение цементного камня силовым элементом не вызывает развитие микротрещин.

Для проведения динамических испытаний над СЭ установлен ЭУУ 4 (рис. 2). В СЭ закачивается масло под давлением 15 МПа, затем включается ЭУУ в рабочем режиме (энергия удара $E_{уд} = 150–160$ Дж; частота удара $f = 3$ Гц), временной интервал между выполнением опрессовок 10 ч. По усредненным показаниям относительного снижения давления опрессовки построена зависимость, изображенная на рис. 4.

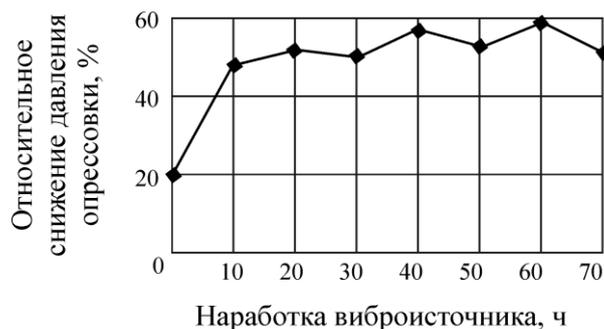


Рис. 4. Зависимость относительного снижения давления опрессовки от наработки виброисточника

Из представленной зависимости следует, что, в первые часы работы виброисточника (до 10 ч) происходит формирование новой динамической структуры микротрещин в цементном камне. Процесс сопровождается увеличением значения относительного снижения давления опрессовки с 20 до 50 %. После протекания переходных процессов в цементном камне устанавливается стабильная динамическая структура микротрещин, при которой относительное снижение давления опрессовки находится в диапазоне 50–60 %. Наиболее важным показателем является отсутствие прорыва опрессовочной воды на открытые поверхности. Это свидетельствует о том, что динамическая структура микротрещин устанавливается в локальной зоне цементной крепи. Высота этой зоны примерно равна длине контакта силового элемента с обсадной трубой (266 мм).

ВЫВОДЫ

Тампонажный раствор после заливки и полного затвердевания имеет трещиновато пористую структуру, которая является причиной снижения конечного давления опрессовки относительно начального на 20–25 %. Воздействие виброисточника на эксплуатационную колонну статической распорной силой не нарушает исходную структуру пор и микротрещин в цементном камне. Виброимпульсное воздействие скважинным электромагнитно-импульсным источником приводит к формированию локальной динамической структуры микротрещин в зоне механического контакта силового элемента с обсадной трубой, где величина относительного снижения давления опрессовки составляет 50–60 %. При этом не происходит выделения опрессовочной жидкости из тела камня на открытые поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Gaifullina M. M. and Makov V. M.** Assessment of the development of the oil refining sector of the Russian Federation, *Oil and gas business*, 2016, no. 4. pp. 208–214 [Гайфуллина М. М., Маков В. М. Оценка развития нефтеперерабатывающего сектора Российской Федерации // Нефтегазовое дело. — 2016. — № 4. — С. 208–214.]
2. **Gazizov A. A.** Enhanced oil recovery at late stage of heterogeneous reservoir development. Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2002, 639 pp. [Газизов А. А. Увеличение нефтеотдачи неоднородных пластов на поздней стадии разработки. — М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”. — 2002. — 639 с.]
3. **Sheng J. J., Leonhardt B., and Azri N.** Status of polymer-flooding technology, *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2015, vol. 54, issue 2, pp. 116–126.
4. **Bera A. and Babadagli T.** Status of electromagnetic heating for enhanced heavy oil/bitumen recovery and future prospects: A review, *Applied Energy*, 2015, vol. 151, pp. 206–226.
5. **Delamaide E., Bazin B., Rousseau D., and Degre G.** Chemical EOR for heavy oil: The Canadian experience, *SPE EOR Conference at Oil and Gas West Asia 2014: Driving Integrated and Innovative EOR2014*, pp. 566–596.

6. **Esmailzadeh P., Sadeghi M. T., Fakhroueian Z., Bahramian A., and Norouzbeigi R.** Wettability alteration of carbonate rocks from liquid-wetting to ultra gas-wetting using TiO_2 , SiO_2 and CNT nanofluids containing fluorochemicals, for enhanced gas recovery, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 26, pp. 1294–1305.
7. **Dyblenko V. P., Margunov E. Yu., Tufanov I. A., et al.** The wave of technologies and their use in exploitation of oilfields with hard recoverable resources, Moscow, RANS, 2012, 344 pp. [**Дыбленко В. П., Марчуков Е. Ю., Туфанов И. А. и др.** Волновые технологии и их использование при разработке месторождений нефти с рудноизвлекаемыми запасами. — М.: РЕАН, 2012. — 344 с.]
8. **Simonov B. F., Neyman V. Yu., and Kordubailo A. O.** Optimization of Vibratory Source Electromagnetic Drive Operating Process, 19th International Conference of Young Specialist on Micro- Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2018, pp. 759–762.
9. **Simonov B. F., Kordubailo A. O., Neiman V. Yu., and Polishchuk A. E.** Work processes in a pulsed linear electromagnetic drive downhole vibration source, *Physical and technical problems of the development of mineral resources*, 2018, no. 1, pp. 71–78 [**Симонов Б. Ф., Кордубайло А. О., Нейман В. Ю., Полищук А. Е.** Рабочие процессы в импульсном линейном электромагнитном приводе скважинного виброисточника // ФТПРПИ. — 2018. — № 1. — С. 71–78.]